

指向性スピーカと波面合成法を用いた スケーラブル三次元放射音場再生システムの理論的検討*

○木村敏幸（東北学院大学）

1 はじめに

近年、立体映像や立体音響を用いた超臨場感コミュニケーションに関する研究が行われている [1, 2]. この技術を適用すれば、Fig. 1 に示す 3D テレビのように、三次元空間中に立体像が提示され、複数の人々が何もデバイスを身に着けることなく立体像を前後、左右もしくは上下から鑑賞できるようになると考えられる。これにより、今までの映像・音響技術では実現できなかった臨場感もしくは存在感をより感じさせるコミュニケーションやサービスが可能になると期待されている。そのためには、複数の聴取者がヘッドホンのようなデバイスを身に着けることなく立体像の音を聞くことができる立体音響技術を開発する必要がある。



Fig. 1 Future image of ultra-realistic communication such as 3D television using 3D video and 3D audio [1].

このような立体音響再生技術として、これまでに指向性スピーカと波面合成法を用いた三次元放射音場再生システムを提案してきた [3]. しかしながら、このシステムは放射型スピーカアレイで再生する音響信号は音源信号に音響伝達関数を畳みこむことを前提としており、音源を直接収録することや音響伝達関数データベースをあらかじめ作成しておくことに多大な手間がかかるという欠点がある。

一方で、提案したシステムを検討するために、

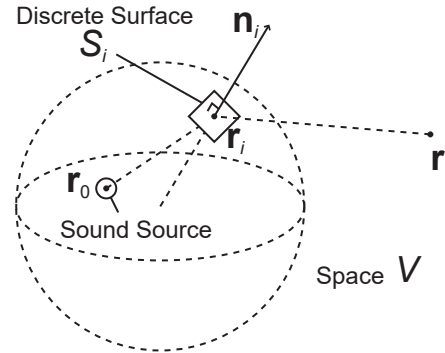


Fig. 2 Coordinates in the conventional system [3].

既に構築されていた包囲型マイクロホンアレイの1/4の大きさに設計した放射型スピーカアレイをこれまでに試作した。システムのデモ展示のために、包囲型マイクロホンアレイの内部で弦楽四重奏を収録し、放射型スピーカアレイで直接再生したところ、マイクロホンアレイと放射型スピーカアレイの大きさが異なっているにもかかわらず、放射型スピーカアレイの内部で弦楽四重奏が再生されているように感じた [4]. この手順ならマイクロホンアレイで収録した音を再生するだけで三次元放射音場のリアルタイム配信が実現できるが、なぜそのように感じるのかまでは詳細に解明されなかった。

本報告では、上記の現象の原因を解明するために、特定の条件を満たせばマイクロホンアレイと放射型スピーカアレイの大きさが異なっても三次元放射音場が忠実に再現されることを数理的に導出する。

2 システムの理論的検討

2.1 従来システムの原理 [3]

Fig. 2 に示すように、境界面 S より外側の空間 V 上の点における位置ベクトルを \mathbf{r} 、離散化した境界面 S_i における位置ベクトルを \mathbf{r}_i 、 \mathbf{r}_i における境界面の外側方向への法線単位ベクトルを \mathbf{n}_i とし、境界面 S 内に音源が存在する場合、 \mathbf{r} における音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ は先に提案したシステム [3] よ

* Theoretical Study of Scalable 3D Radiated Sound Field Reproduction System with Directional Loudspeakers and Wave Field Synthesis. by KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin University)

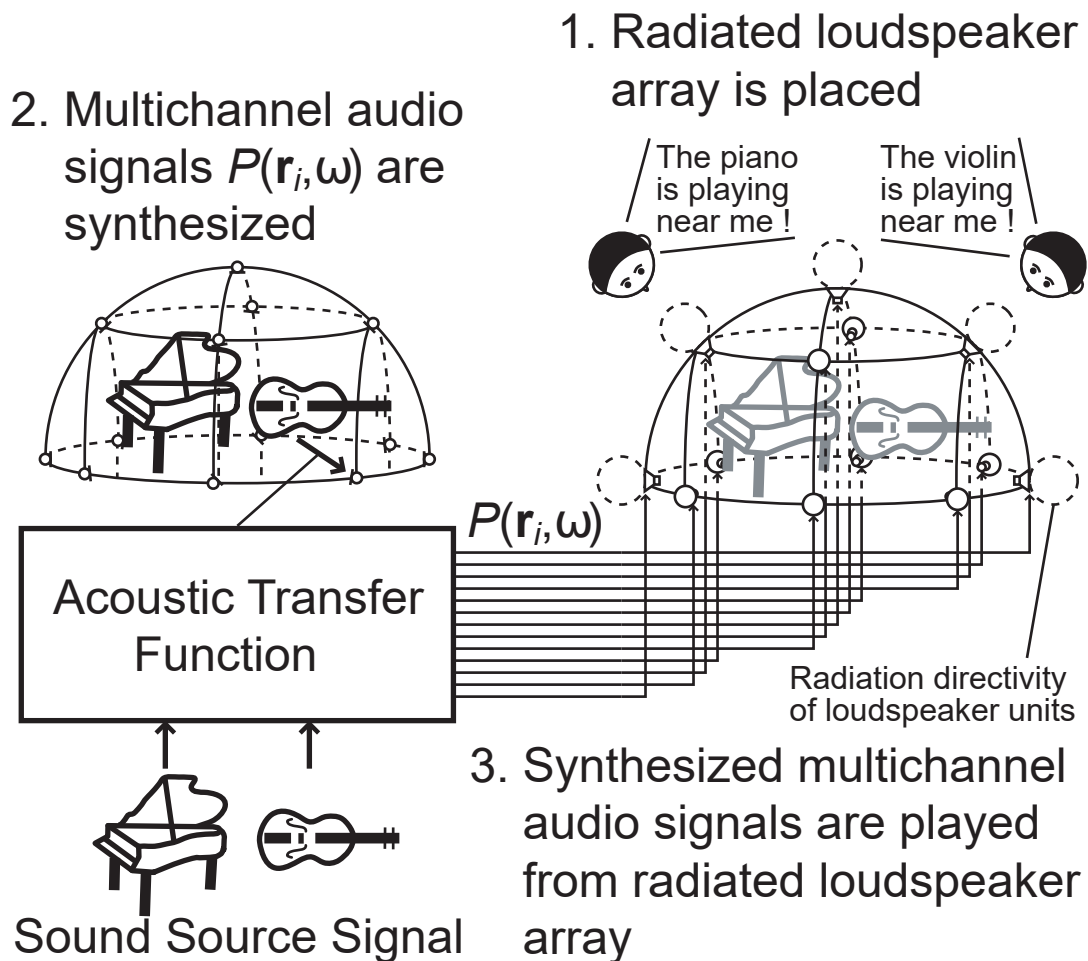


Fig. 3 Diagram of the conventional system [3].

り以下の式のように表される。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) D(\theta_i) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (1)$$

但し、 M は分割した境界面の数、 ΔS_i は離散した境界面 S_i の面積、 $D(\theta_i)$ は \mathbf{r}_i に配置したスピーカの放射特性、 $k (= \frac{\omega}{c})$ は波数、 ω は角周波数、 c は音速である。(1)式は原音場において M 個の点 \mathbf{r}_i 上の音圧 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ をマイクロホンで収録し、再生音場において M 個の点 \mathbf{r}_i 上で大きさ $jkP(\mathbf{r}_i, \omega)$ の指向性音源を再生すると、再生音場における空間 V において原音場での収録時と同じ音圧が合成されることを示している。その際、 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ は以下の式のように表される。

$$P(\mathbf{r}_i, \omega) = \frac{AD_0(\theta_0, \phi_0)e^{-jk|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} \quad (2)$$

但し、 \mathbf{r}_0 は音源の位置ベクトル、 A は音源の振幅、 $D_0(\theta_0, \phi_0)$ は音源の指向特性を表す。

従来システムの構成を Fig. 3 に示す。まず、再生音場において計 M 個の指向性スピーカで構成される放射型スピーカアレイを配置する。その際、指向性スピーカは境界面の外側に向ける。次に、(2)式に従って音源から M 個の無指向性マイクロホンまでの音響伝達関数を音源信号に畳み込み、マルチチャンネル音響信号 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ を合成する。その際、マイクロホンの位置は指向性スピーカの位置と同じにする。そして、合成した音響信号 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ を放射型スピーカアレイから再生する。その結果、(1)式に従って放射型スピーカアレイの外側に三次元放射音場が合成されるので、境界の外側にいる聴取者はあたかも境界内で音源が鳴っているように感じる。Fig. 3 の場合、ピアノの近くにいる人はピアノがそばで鳴っているように感じ、バイオリンの近くにいる人はバイオリンがそばで鳴っているように感じる。

しかしながら、このシステムでは包囲型マイクロホンアレイと放射型スピーカアレイの大きさが同じであることを前提としているので、合成される三次元放射音場の大きさは放射型スピー

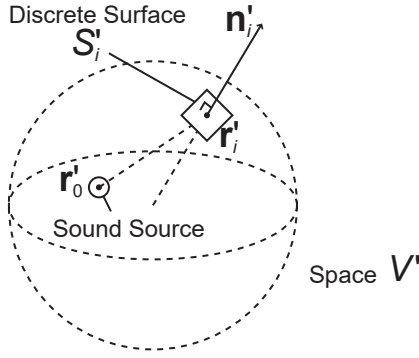


Fig. 4 Coordinates of recording sound field in the proposed system.

カアレイの大きさに依存することになる。そのため、包囲型マイクロホンアレイの大きさが放射型スピーカアレイと異なる場合、包囲型マイクロホンアレイで収録した三次元放射音場を忠実に再現することができない。

2.2 提案システムの原理

包囲型マイクロホンアレイで収録することを想定するため、Fig. 4に示すように、原音場の大きさを再生音場の α 倍に設定する。すると、離散化した境界面 S_i' における位置ベクトル \mathbf{r}_i' は再生音場における指向性スピーカの位置ベクトル \mathbf{r}_i と相似になるため、境界面における法線単位ベクトル \mathbf{n}_i' 、音源の位置ベクトル \mathbf{r}_0' 、音源からマイクロホンまでの距離 $|\mathbf{r}_i' - \mathbf{r}_0'|$ は以下の式のように定義される。

$$\mathbf{n}_i' = \mathbf{n}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_i' = \alpha \mathbf{r}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_0' = \alpha \mathbf{r}_0 \quad (5)$$

$$|\mathbf{r}_i' - \mathbf{r}_0'| = |\alpha \mathbf{r}_i - \alpha \mathbf{r}_0| = \alpha |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0| \quad (6)$$

従って、原音場における音圧 $P(\mathbf{r}_i', \omega)$ は(2)式より以下の式のように表わされる。

$$\begin{aligned} P(\mathbf{r}_i', \omega) &= \frac{AD_0(\theta_0, \phi_0) e^{-jk|\mathbf{r}_i' - \mathbf{r}_0'|}}{|\mathbf{r}_i' - \mathbf{r}_0'|} \\ &= \frac{AD_0(\theta_0, \phi_0) e^{-jk\alpha|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}}{\alpha |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \\ &= \frac{AD_0(\theta_0, \phi_0)}{\alpha} \frac{e^{-jk'|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \end{aligned} \quad (7)$$

但し、 $k' = \alpha k = \frac{\alpha \omega}{c}$ である。

ここで新たに設定した波数 k' に着目すると、 k' は以下のように変形できる。

$$k' = \alpha k = \frac{\alpha \omega}{c} = \frac{\omega}{\frac{c}{\alpha}} = \frac{\omega}{c'} \quad (8)$$

つまり、包囲型マイクロホンアレイの大きさに合わせて原音場の大きさを α 倍にした場合、再生音場における放射型スピーカアレイ内の音場は音速が $c' (= \frac{c}{\alpha})$ の音場であると解釈できる。従って、マイクロホンと指向性スピーカの配置が相似であれば、包囲型マイクロホンアレイで収録した音を放射型スピーカアレイで再生するだけで、音速が $\frac{1}{\alpha}$ 倍に変化され、大きさが $\frac{1}{\alpha}$ 倍に拡大・縮小された三次元放射音場が忠実に再現されると言える。

導出した原理に基づいて提案するスケラブル三次元放射音場再生システムの概要をFig. 5に示す。まず、再生音場において計 M 個の指向性スピーカで構成される放射型スピーカアレイを配置する。その際、指向性スピーカは境界面の外側に向ける。

次に、原音場において放射型スピーカアレイの大きさを α 倍に変化させた制御領域を設定し、制御領域の境界面上 \mathbf{r}_i に M 個のマイクロホンを配置する。その際、マイクロホンの位置は指向性スピーカの位置と相似にする。

最後に、包囲型マイクロホンアレイで制御領域内の音場を収録し、収録した音響信号を M 個の指向性スピーカで再生する。その結果、放射型スピーカアレイ内部の音速が $\frac{1}{\alpha}$ 倍に変化し、大きさが $\frac{1}{\alpha}$ 倍に拡大・縮小された三次元放射音場が聴取領域において再現され、聴取領域にいる聴取者たちはあたかも原音場における演奏を取り囲んで聴いているように感じる。Fig. 5の場合、ピアノ奏者の近くにいる人は大きさが $\frac{1}{\alpha}$ 倍に拡大・縮小されたピアノ奏者がそばで鳴っているように感じ、バイオリン奏者の近くにいる人は大きさが $\frac{1}{\alpha}$ 倍に拡大・縮小されたバイオリン奏者がそばで鳴っているように感じる。

3 まとめ

本報告では、先に提案した三次元放射音場再生システムにおいて、包囲型マイクロホンアレイの大きさが放射型スピーカアレイと異なる場合に再生される音場を理論的に検討した。その結果、マイクロホンと指向性スピーカの配置が相似であれば、包囲型マイクロホンアレイで収録した音を放射型スピーカアレイで再生すると、音速が変化し、大きさが拡大・縮小した三次元放射音場が忠実に再現されることが導出された。

今後の方針としては、今回提案したスケラ

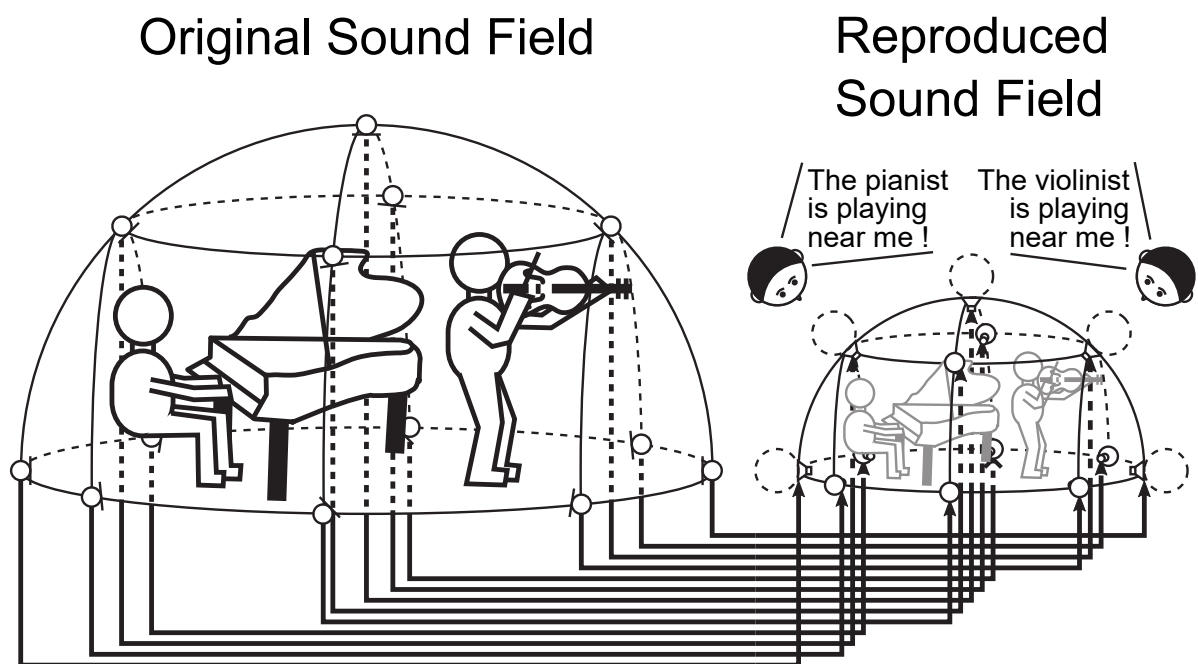


Fig. 5 Diagram of the proposed system.

ブル三次元放射音場再生システムの妥当性を計算機シミュレーションによって数值的に解析していくことが考えられる。また、提案システムの実環境における性能を検討するために、放射型スピーカアレイや包囲型マイクロホンアレイを試作し、音響計測や聴取実験を実施していくことも考えられる。

loudspeakers and wave field synthesis”, Proc. WESPAC, No. 0164, pp. 1–6 (2009).

参考文献

- [1] K. Enami: “Research on ultra-realistic communications”, ECTI Trans. Elect. Eng., Electro., Comm., **6**, 1, pp. 22–25 (2008).
- [2] 廣瀬通孝, 榎並和雅: “高臨場感・超臨場感通信サービスの将来像”, 電子情報通信学会誌, **101**, 8, pp. 772–779 (2018).
- [3] T. Kimura, Y. Yamakata, M. Katsumoto, T. Okamoto, S. Yairi, Y. Iwaya and Y. Suzuki: “Three-dimensional radiated sound field display system using directional loudspeakers and wave field synthesis”, Acoust. Sci. & Tech., **33**, 1, pp. 11–20 (2012).
- [4] T. Kimura, Y. Yamakata, M. Katsumoto, T. Okamoto, S. Yairi, Y. Iwaya and Y. Suzuki: “Development of real system in near 3d sound field reproduction system using directional